

21世紀 COE プロジェクト 「プロダクティブ ICT アカデミア」

上田 和紀 早稲田大学理工学術院 ueda@ueda.info.waseda.ac.jp
 大石 進一 早稲田大学理工学術院 oishi@waseda.jp
 甲藤 二郎 早稲田大学理工学術院 katto@waseda.jp
 中島 達夫 早稲田大学理工学術院 tatsuo@dcl.info.waseda.ac.jp
 村岡 洋一 早稲田大学理工学術院 muraoka@waseda.jp
 山名 早人 早稲田大学理工学術院 yamana@acm.org

我々の目指すもの

「プロダクティブICT (Information and Communication Technology) アカデミア」プロジェクトは、早稲田大学理工学研究科情報科学専攻、電気工学専攻、電子・情報通信学専攻(組織は申請当時)ならびに国際情報通信研究科所属の教員が組織したプロジェクト(代表:村岡洋一)であり、その目指すところは下記の通りである。

(1) 組織として

単に論文のための研究に終わらず、具体的に社会に還元できる成果を発信できる組織の構築を目指す。

(2) 研究として

地球規模ネットワークの時代に、「こういう世界を作りたい」という明確な目的意識のもとに進める。

さらに具体的に述べると、

(1) の達成のためには、

- 「異文化」交流 = オープン化を図る

世界トップレベル研究者の招聘、海外研究所新設(中国、シンガポール)、研究実用化促進会社設立、ICTアーキテクト専攻新設などによる産業界との緊密な連携。

- 逃げない研究 = 未来の創造

開拓研究(論文)に終わらず、実証実験までを目指している。

(2) の達成のためには、

- 無数のCPUを接続したい

⇒ ユニバーサルコンピューティング学(図-1)

- 無数の情報を広めたい

⇒ マルチメディアコンテンツ学(図-2)

の2本の柱を立てた。

以下、本稿では紙面の制約もあるので、ユニバーサルコンピューティング学を中心に置いて、その内容の紹介を行いたい。

ハードウェア、ネットワーク

ユビキタス社会を支える先進的な情報処理技術は、ハードウェアとネットワークの急激な技術革新によって支えられている。本サブグループは、SoC (System on Chip) と次世代ネットワークを主要検討課題に掲げ、プロダクティブICTアカデミアの基盤技術を確認すべく活動を続けている。

近年の集積度の向上とともに、半導体の役割も、コンピュータの部品としての役割から、コンピュータを部品としてシステムに組み込む役割へとパラダイムシフトが進んでいる。現在、日本が得意とされる携帯電話、車載エレクトロニクス、デジタル情報家電等々は、こうしたシステムLSI技術の進化によって支えられている。そこで、我々は将来のユビキタス社会を見越し、プロセッサから無線インタフェースまで、必要な計算要素をコンパクトに集積化したユビキタスSoCの実現を長期目標に掲げている。一方、SoC技術は、デバイスからシステム設計に至る広大な横断技術であり、解決すべき課題は数知れない。そこで本サブグループは、特に日本が不得意とされる設計技術の確立に重点を置き、低消費電力化設

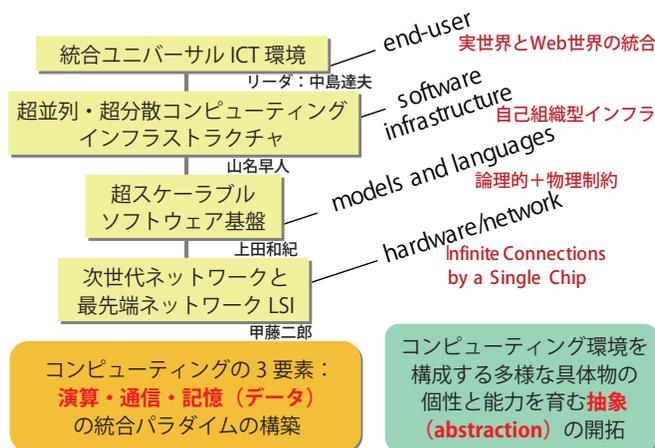


図-1 ユニバーサルコンピューティング学

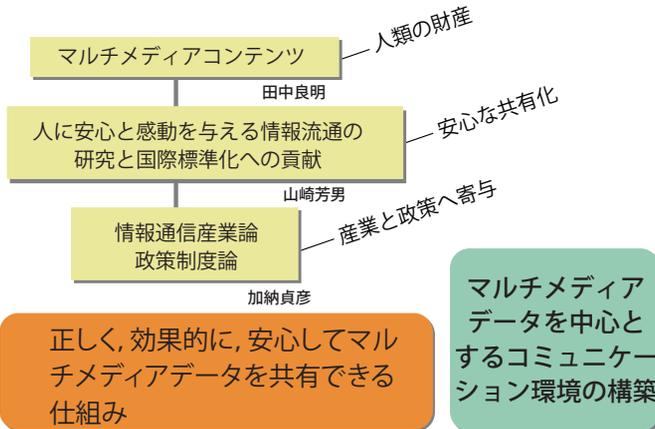


図-2 マルチメディアコンテンツ学

計、高速化設計、設計自動化、等に関する研究開発を進めている。また、ネットワーク処理、セキュリティ処理等に特化した各種アクセラレータの設計、試作を進めている。

次世代ネットワーク技術

ユビキタス社会を構成する次世代のネットワークは、All-IP化のみを共通項とし、多様な環境や応用を想定した各種のネットワーク技術から構築されると考えられる。特に我々は無線通信とネットワーク管理技術の確立に重点を置き、活動を進めている。

今後の無線通信では、変復調や多重アクセスの改良による広帯域化が進行するだけでなく、自律分散的なネットワーク構築機能やシステムレベルの低消費電力技術の技術革新が求められる。本サブグループでは、広帯域無線に関する各種の理論基盤を提案するとともに、自律分散プロトコルの設計や無線シミュレータの開発、各

種の実機評価を進めている。

また、今後のネットワークシステムでは、多様化が進む接続環境に安全かつシームレスに対応できる管理技術の確立が求められている。本サブグループでは各種の網管理技術、データ配信技術の設計・評価を進めるとともに、セキュリティや実務者育成に関する検討も進めている。

組織間連携

本サブグループは、組織間連携を積極的に進めている。北九州学研都市の情報生産システム研究科・システムLSI設計分野は、システムLSIの研究者10名から構成される世界的にも非常にユニークな専攻である。また、国際情報通信研究科・情報通信システム分野は、ITUやISO等の国際標準化機関との関係が非常に深く、これもまたユニークな専攻を構成している。このような早稲田大学特有の組織の特長を活かし、基礎研究から実用化研

究に至る幅広い研究開発活動を展開している。

超スケーラブルソフトウェア基盤

本サブテーマでは「21世紀のチューリングマシン」を標語に、大小さまざまな計算環境にマップすることのできる、統合的で汎用な計算モデルとプログラミング言語の開拓を行っている。20世紀のコンピューティングやアルゴリズム設計は、逐次計算のモデルであるチューリングマシンとRAM (random access machine) モデルとを基盤として発展してきた。1つのプログラムがカバーする範囲は物理サイズで1m近辺のスケールの計算機であり、ソフトウェア設計は純粋に論理的な作業と考えることができた。

ところが21世紀のコンピューティング環境は、広域分散化・大規模化の流れと微小化・組込み化の流れが同時並行的に進展しつつある。この2つの流れは、古典的な計算環境を中心として反対の方向に向かっているように見えるが、ソフトウェア技術の観点からは共通の特徴を持つ。それは、通信距離や記憶容量など、計算環境の持つ物理的な特性や制約に真正面から立ち向かう新たなソフトウェア技術が必要となってくる点である。

そのような技術の構築をグランドチャレンジに、第一歩として我々は、言語モデルLMNtal (elemental と発音) を着想、設計、開発してきた。

LMNtalは、階層グラフの書換えに基づく並行計算モデルである。LMNtalのLはlogical linkを、Mはmembraneおよびmultisetを、Nはnested nodeを表しており、

- 論理変数を用いたノード間結合構造（グラフ構造）の表現機能と
- 膜を用いた多重集合および階層化の表現機能の同時提供を最大の特徴としている。

我々は、計算の状態やデータ構造を理解したり人に伝えたりするためにしばしば図を描くが、そこで表現しようとするものは、多くの場合、要素間の接続関係と階層関係であろう。また計算とは、それらの関係に変化を加えてゆくことにほかならない。LMNtalは、計算に対するこのような直感的なとらえ方をダイレクトに支援する。

LMNtalは計算に関する既存の諸概念の統合を目指しており、動的データ構造の操作から並行分散計算にいたるさまざまな計算を統一的に扱うことができる。さらに、階層グラフ書換えは、多重集合書換え計算モデルや自己組織化に基づく計算モデルなどを特別な場合として含んでおり、既存の多くの計算モデルの架け橋となることが期待できる。

LMNtalを言語モデルと呼ぶのは、理論計算モデルと具体的かつ実用的なプログラミング言語の双方を同時に

提供することを目指しているからである。実際、我々のグループでは言語設計と並行して実装方式の検討を進め、実用言語に必要な諸機能を一通り備えた処理系を開発、公開してきた (<http://www.ueda.info.waseda.ac.jp/lmntal/>)。

さらに、スケーラブルなソフトウェア基盤となり得ることを検証するために、LMNtalサブセットを移動ロボットの実機上で動かしてイベント駆動制御を実現するとともに、計算ドメインの表現と管理に膜概念を利用した分散処理系の設計と実装も行ってきた。

実用化研究の一方で基礎研究もちろん進めている。グラフ書換えのための型体系が典型例であるが、そのほかに、LMNtalによるアルゴリズム記述を通じて、プログラムの持つ対称性や計算の可逆性に関する考察を進めてきた。対称性や可逆性の視点から計算の本質を見直すことは、強固で検証可能なソフトウェア基盤の確立にきっと役立つと考えているからである。

ソフトウェアの検証は実用化の大変難しい技術であると信じられているが、ソフトウェアが社会基盤たり得るためには検証の問題を避けることはできない。

モデル検査などの自動検証技術は最近ようやく脚光を浴びるようになった。それも1つの方向であるが、普通のソフトウェア技術者が容易に理解できるhuman-orientedな検証というのが検証のもう1つの究極の姿であろう。そのような検証技術を確立することもまた、計算の論理と物理の統合とともに、21世紀のコンピュータサイエンスのグランドチャレンジである。

知的な生活日用品を用いた次世代ユビキタスコミュニケーション環境

「ユビキタス」という用語が一般的に使用されるようになってからすでに数年が経過し、スマートスペースやセンサネットワークなどの技術開発が盛んに行われている。しかし、「ユビキタス」環境が実現可能とする知的生活環境はなかなか実現していない。その大きな理由としては、今まで提案されている技術ではセンサを部屋中に埋め込むなどインストレーションコストが大きくなってしまい、コストを度外視できる場合を除き実用的にユビキタス技術を利用することが困難であった。また、新しいデバイスを導入することにより、新たな操作方法の習得を要求する場合は、ユーザの負担も大きなものになってしまう。

以上の問題を解決するため、我々のアプローチでは、身の回りにある日用品にセンサやコンピュータを埋め込み、ユーザにとって自然に拡張する知的日用品を提案している (図-3)。知的日用品は、普通は通常の日用品と

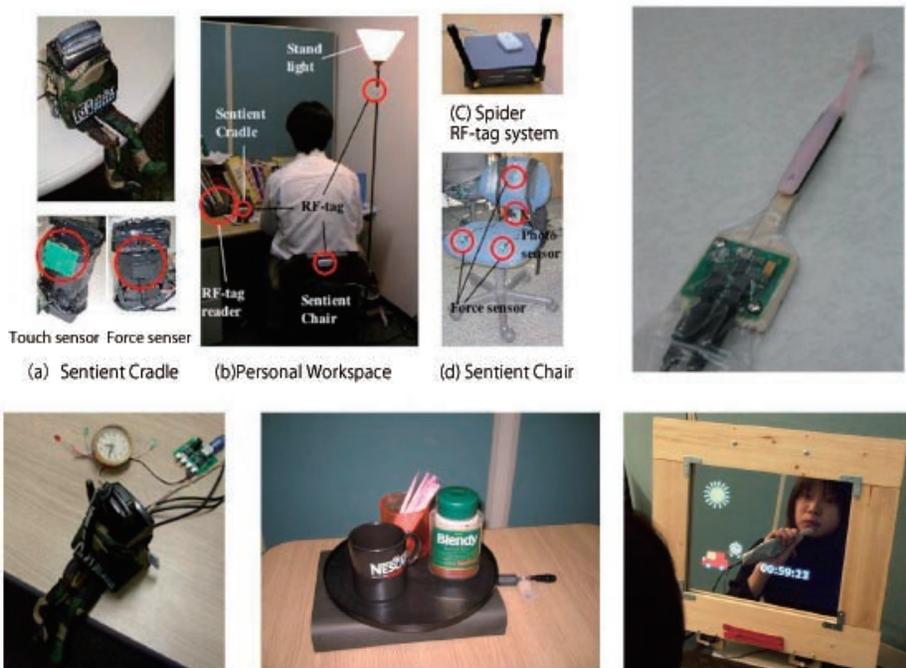


図-3 知的日常品

して利用することができる。たとえば、我々が開発した知的日常品であるドアや椅子は日常品として普通に利用することが可能である。しかし、これらの日常品にセンサを埋め込み、ユーザが部屋に入ったり、椅子に座っているという情報を利用することで、ユーザの状況に応じて振る舞いを最適化する状況依存型のアプリケーションを容易に構築することが可能となる。将来の生活環境にはさまざまなサービスが埋め込まれると思われる。知的日常品を利用して自然にユーザに関するさまざまな情報を利用可能とすることは、「ユビキタス」環境の実現を格段に容易にすることが期待される。

また、我々が開発した知的日常品の1つである AwareMirror (図-3の右下) のように、本来のタスクの遂行を邪魔せずに自然なかたちで情報提供を行う日常品の構築も行っている。AwareMirrorは、鏡の前にいるユーザが誰であるかを認識し、そのユーザが必要とする情報をイメージなどの直感的に分かりやすいかたちで表示する。ユーザは AwareMirror を通常の鏡として利用することが可能であり、できる限り日常品が本来持っている機能を損なわないことを重視してデザインしている。

知的日常品は、以下の3つの利点が存在する。

- (1) 徐々に知的日常品を増やすことによりインクリメンタルに知的環境を構築することが可能となる。
- (2) 通常の日用品として利用できるため、使用法を覚えなくても本来の機能を利用することが可能である。
- (3) 日常の行動の中から自然にコンテキストを抽出することが可能となる。

以上の利点は、従来の「ユビキタス」を実現する技術の多くの問題点を改善し、「ユビキタス」技術の実用化を加速すると思われる。また、知的日常品を利用することにより、新しい形態のコミュニケーションの実現が可能であると考えられる。たとえば、我々は、新しい形態のコミュニティ形成の支援、プレゼンス支援、パーソナライズ可能なサービスの支援など実現に関する検討を行っている。さらに、世界中の知的日常品からさまざまな情報を収集することにより世界中で何が起きているかを正確に知ることも可能となる。収集した実世界に関する情報を分析し、Web上の情報と統合することにより、新しいサービスの実現が期待される。

「ユビキタス」環境では、さまざまなサービスが我々の身の回りの環境に埋め込まれる。その場合、環境に埋め込まれたサービスをどのように探し、どのようにサービスを制御するかが大きな問題となる。我々のアプローチでは、図-4に示すようなさまざまなセンサを搭載した携帯端末を利用してサービスの発見や制御を行う。携帯端末は、プラグアンドプレイ等の仕組みを利用して、身近に埋め込まれたサービスを発見する。また、センサを利用することにより、ユーザがどのように行動しているかに関する情報を抽出する。また、端末を振るなどのユーザのアクションを利用してサービスの制御が可能になる。

日常品にRFタグを埋め込み、そのタグに個人の好みをエンコードすることにより新しい形態の個人向けサービスを実現する実験も我々は行っている。たとえば、マ



図-4 センサ埋め込み

グカップ、ぬいぐるみ等の日常品に個人の好みを埋め込み、それらの日常品を手を持つことによりサービスの振る舞いをカスタマイズすることを可能とする。また、シールにユーザの好みを埋め込み、複数のシールを形態端末に挿入することによりユーザが明示的にサービスをカスタマイズすることも可能となる。

「ユビキタス」環境を実現する計算機は、インターネットを介して世界中と接続し、24時間稼働する必要がある。そのような計算機を実現するためには、ITRONやLinux等の従来のオペレーティングシステムでは不十分である。たとえば、バグが存在するプログラムをダウンロードすることによりリソースが占有されシステムがダウンしてしまう可能性が生じる。また、インターネットを介した攻撃によりシステムの動作が停止してしまう可能性も生じる。以上の観点からは、従来のオペレーティングシステムは不十分であり、信頼性、セキュリティを格段に向上したオペレーティングシステムなしには実用的な「ユビキタス」環境の構築は不可能である。我々は、現在、Linuxのリソース管理機構の改良、仮想マシンを用いた高信頼OSの実現、自律的に回復可能なアプリケーションフレームワーク等、信頼性やセキュリティを格段に改善するためのOSサポートに関する研究を行っている。

以上の研究を通して、安全なユビキタス環境の実現や新しい人間間のコミュニケーションの実現が可能となり、「ユビキタス」環境が我々の生活をより豊かなものにすることが期待される。

Web 情報収集

近年のIT化により、デジタル化された膨大な情報が各個所で蓄積されている。そして、これらの情報には知識が埋もれている。こうした知識は、一昔前まで人同

士の交わりを介して伝達されてきたため、人が一生をかけたとしても、得ることのできる知識には自ずと限界があった。これに対し、すべての情報がネットワークにより共有できるようになった今、膨大な情報の中から知識を的確に抽出することができれば、これまで人が一生かかっても得ることのできなかった知識を習得し、有効に活用することが可能となる。

このような背景のもと、超並列・超分散コンピューティング・インフラストラクチャグループでは、超大規模データの中から現実的な時間内に知識を発見し活用することを目標としている。具体的には、2004年末で100億ページを超えるとされるWebデータ、そして実世界から得られるユビキタスデータを対象とし、グリッドシステムやPCクラスタを用い「知の創出」を目指している。

Webデータについては、図-5に示すように、2005年1月までに約35億ページを収集済みであり、2006年度末までに100億ページを達成する予定である。2005年1月時点でWebページ収集量世界一はGoogleであり80億ページとなっている。本プロジェクトでは、Googleの規模を超える世界一のデータを収集・解析することによって、有用な知識発見を目指している。なお、収集においては、世界中のWebページを効率よく収集するために、国内5カ所にWebページを自動的に収集するためのクローラを配置し分散収集を実現している。

また、これらの収集済みデータの中から知識を発見するに先立ち、Webページの自動グルーピング(Webコミュニティと呼ぶ)を行う方式を開発した。本手法はPlusDBGと呼ばれ、従来のWebコミュニティ抽出法で問題となった「網羅性を上げると精度が落ちる」という点に関して、従来手法であるDBGと同じ精度を保ちながら網羅性を上げることに成功した。従来のDBG手法に比較して、精度を保ったままコミュニティ数を増加さ

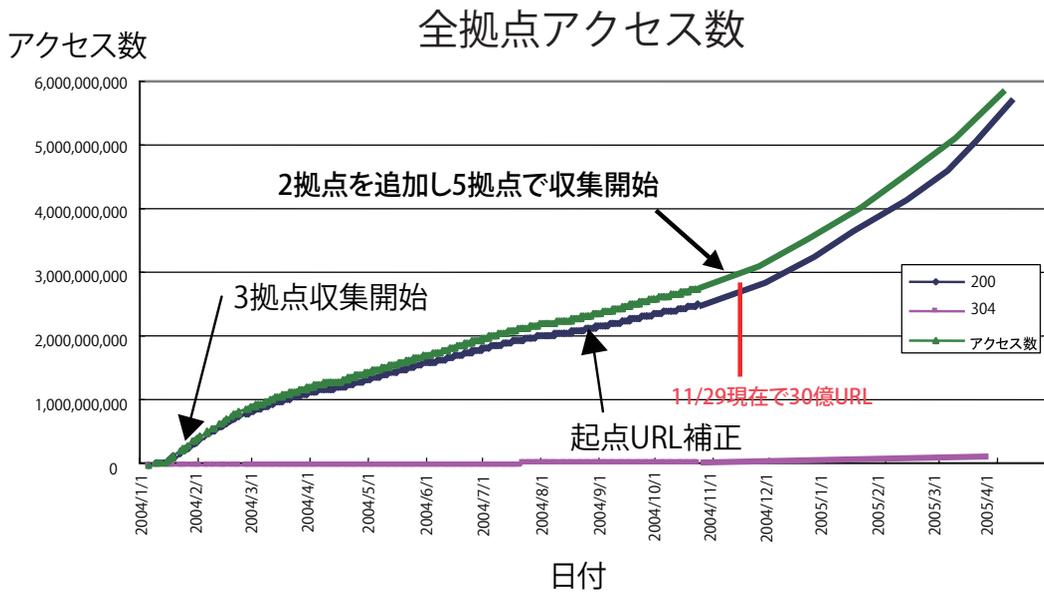


図-5 Web情報の収集状況

せることができている。

さらに、膨大なデータを対象に現実的な時間内にマイニングを行い知識発見を実現するための手法として、データマイニングのターンアラウンド時間を短縮するTF2P-growth手法を提案している。本手法は、従来ユーザがマイニング開始時に設定しなければならなかった最小サポート値や結果出力数を設定することなく、頻度の高い頻出パターンから順に自動的に抽出する手法である。

また、多数の知識を発見した際に、ユーザに対してどのような順番で提示していくのがよいかを検討するために、既存の検索エンジンを対象としたランキング評価手法の提案を行った。本手法では、ユーザが欲しいと感じるデータがどのような順序で並んでいる時に、ユーザがそのランキングを使いやすいと思うかをパラメータとした評価手法である。

今後は、他グループの研究結果として得られる実世界データを統合したマイニングを行うことによって、誰もが「はっとする」知識の抽出を目指す予定である。

精度保証付き数値計算とスケーラビリティ

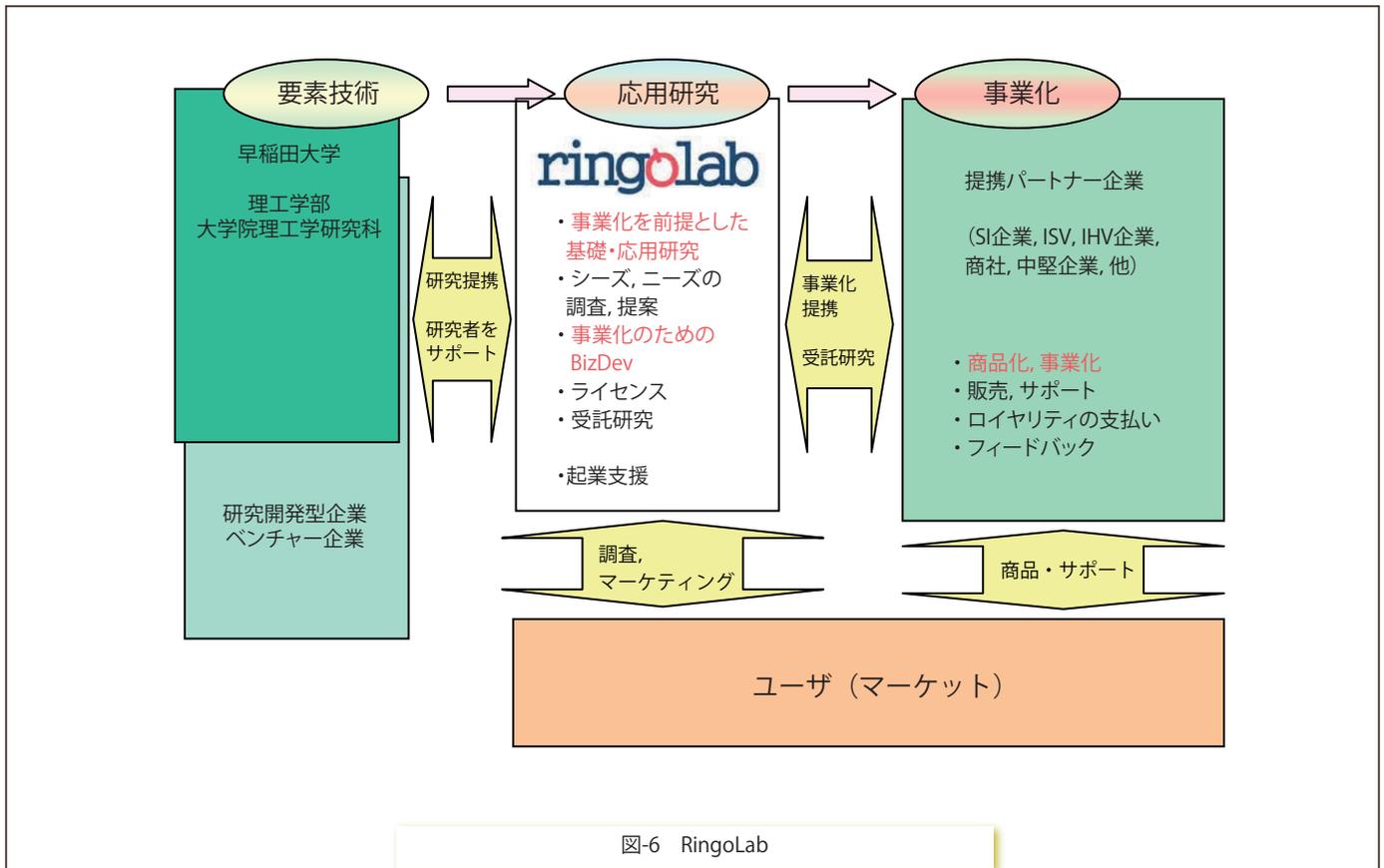
数値計算を行うにあたって現れるすべての誤差(丸め誤差、打ち切り誤差、離散化誤差)の影響を正しく考慮して、数学的に厳密な意味での誤差評価を伴う数値計算を精度保証付き数値計算という。「数値計算といえば精度保証付き数値計算である」といわれる時代が到来することを目標に研究を行っている。この目標を達成するためには、近似解を計算するだけの現在の数値計算に対して、同じ計算環境で、同程度の(あるいは必要最小限に

近い)計算時間で、精度保証付き数値計算ができることを示すことが必要と考え、研究を進めている。数値計算の基盤が線形計算に帰着することにより、本研究では、線形計算に目標を限定している。

数値計算はさまざまな計算機環境で行われる。それらの計算結果を保証するためには、浮動小数点数に関する標準が制定されていることが望ましい。この点で、1985年にIEEE754の浮動小数点規格が制定されて、ほとんどすべてのCPUで採用されていることは大変有利なことである。IEEE754の制定の中心人物であるKahanは精度保証付き数値計算の基礎となる区間演算を実装しやすいように、4種類の丸めのモードを定義し、その上で浮動小数点数の四則演算を定義した。本研究グループでは、この丸めのモードの切り替えを利用して、浮動小数点数を成分とする行列A,Bの積の包み込みが

```
Up(); /* +無限大方向への丸め */
U=A*B; /* AとBの積 */
Down(); /* -無限大方向への丸め */
L=A*B;
```

という丸めのモードの2回の切り替えででき、しかも行列の積の部分は従来の数値計算ライブラリがそのまま使えることを示した。この結果、近似解を計算している計算機環境に丸めのモードの変更の命令を組み込むだけで、行列A,Bの積の包み込みができることが明らかになった。この結果を基に、連立一次方程式の近似解や、行列の固有値や特異値の精度保証がほぼ近似解を求めるのと同じ時間で得られることを明らかにした。現在では、クラ



スタ計算機により数万次元の密行列の各種の線形問題の精度保証付き数値計算が可能であることを明らかにしている。

一方、IEEE754などに実装されている、最近点への丸めだけが実装されていると、浮動小数点数の最近点への丸めのモードでの和と積の誤差が再び浮動小数点数になることを利用して、浮動小数点数を成分とするベクトルの内積が所望の精度で得られることを示した。これを利用して、特別のライブラリを導入することなく、浮動小数点数の精度いっぱいの精度を持った近似解を精度保証付きで必要最小限に近い計算時間で計算できることを示した。

以上のような発展をベースに、数千万次元の疎行列システムに対する精度保証付き数値計算法を構築することを今後5年ぐらい以内の目標に研究する体制を整えつつある。このためには、理論的にも計算機環境的にも格段の進展が必要で、21世紀COEの研究費に加えてJSTの研究費や富士写真フィルムからの委託研究費等により、本テーマに関して専任の教授、助教授に加えて、客員教授3名、客員講師4名、助手2名などが本テーマを追求するきわめて充実した研究体制が構築されている。

大学発の成果の社会還元

最初に述べたように、本プロジェクトの目標の1つは、成果を具体的に社会に還元できる体制の構築と、それに基づいた研究を実施することである。この目標達成のため

めに、早稲田大学と企業の仲介を行う会社（RingoLab）を設立した（図-6）。

これまでの成果とこれから

これまでに多数の素晴らしい成果が本プロジェクトから輩出された。それらをすべてここに記すことは不可能であるが、それらの中からあえて3つを取り上げると、

- 世界で一番高速に実行するためのソフトウェア基盤技術の開発（既存並列化コンパイラに比べて3倍以上の並列化）
- 世界で一番高精度で計算するための理論とその実用化（指定された精度を、従来の1,000倍以上の計算速度で保証）
- 応用の一例として、世界で一番高速かつ多量に情報を収集する技術の開発（9億ページを目標）

が挙げられよう。

最後に、上記はプロジェクト全体の一側面の紹介であり、全体については、プロジェクトのWebページ <http://www.info.waseda.ac.jp/COE/index-j.htm> を参照していただきたい。

（平成17年3月16日受付）